西鄂尔多斯天然荒漠灌丛光合生态适应性[①]

党晓宏[1,2]， 蒙仲举[1]， 高 永[1,2]， 刘 阳[3]， 魏亚娟[1]， 哈 琴[4]

（1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院，内蒙古 呼和浩特 010018；
2. 内蒙古杭锦荒漠生态系统国家定位观测研究站，内蒙古 鄂尔多斯 017400；
3. 内蒙古自治区水利科学研究院，内蒙古 呼和浩特 010020；
4. 内蒙古赤峰市巴林左旗林业和草原局，内蒙古 赤峰 025450）

摘 要：为了探究西鄂尔多斯地区荒漠灌丛的光合生态适应性，以4种天然荒漠灌丛半日花（*Helianthemum songaricum*）、红砂（*Reaumuria songarica*）、沙冬青（*Ammopiptanthus mongolicus*）、霸王（*Sarcozygium xanthoxylon*）为研究材料，利用Li－6400便携式光合测定仪野外原位测定荒漠灌丛日光合动态和季节动态规律。结果表明：① 不同季节灌丛光合作用适宜的温度存在差异，高温环境使灌丛净光合速率最适温度升高，低温环境使其降低。② 不同季节4种灌丛的净光合速率、蒸腾速率、水分利用效率和气孔导度日变化曲线趋势为“双峰形”，胞间 CO_2 浓度日变化曲线趋势为“W形”，但不同季节各指标平均日变化趋势表现各异。③ 不同季节灌丛净光合能力表现为：沙冬青＞霸王＞红砂＞半日花，说明沙冬青具有较强的生态适应性。④ 净光合速率和蒸腾速率日变化趋势几乎保持同步状态，表明4种灌丛叶片气孔对外界环境变化反应敏感。⑤ 水分是限制荒漠灌丛生长发育的关键因素。为了保证荒漠植物的群落稳定性和生物多样性，在夏、秋季需对沙冬青、半日花、红砂和霸王进行水分管理。

关键词：生态适应性；光合作用；优势灌丛；动态变化；西鄂尔多斯；内蒙古

西鄂尔多斯地区紧邻乌兰布和沙漠和库布齐沙漠，地理位置特殊，是北方重要的生态安全屏障。该区是西部草原荒漠区的一个特殊区域，植物多样性丰富，分布着一大批国家级重点保护珍稀濒危植物，具有“古地中海孑遗植物避难所”的美誉[1]。其中，沙冬青（*Ammopiptanthus mongolicus*）、霸王（*Sarcozygium xanthoxylon*）、半日花（*Helianthemum songaricum*）、红砂（*Reaumuria songarica*）是该区主要优势种和建群种。沙冬青属常绿阔叶灌木，是阿拉善荒漠区和鄂尔多斯高原特有建群种，为国家首批重点保护的珍稀濒危植物[2]。霸王为旱生肉质灌木，能形成稳定的霸王群落，是亚洲中部荒漠地区重要的特有植物种，在维持荒漠生态系统平衡方面具有重要的作用[3]。半日花为古地中海残遗植物种，是国家二级珍稀保护植物，典型的间断分布，仅在西鄂尔多斯地区以建群种出现[4]。红砂为超旱生小灌木，生态可塑性强，抗旱、耐盐、集沙能力较强。这4种荒漠植物组成的群落对西鄂尔多斯地区的生态保护发挥了重要作用。因此，探究4种荒漠优势灌丛光合特性对西鄂尔多斯荒漠环境的生态适应性，可为该地区生态恢复、环境保护提供技术指导和理论支持。

西鄂尔多斯地区是荒漠草原向荒漠过渡地带的复合生态系统，生态脆弱。荒漠灌丛成为该地区主要的植被类型[5]。由于降雨稀少、蒸发强烈，光照、水分和其他因子共同决定植物的生长及其对环境的适应能力。在相同的外界环境条件下，不同植物的适应能力各有差异[6]。光合作用反映了植物对环境的适应能力。目前，大多数研究通过净光合速率（P_n）、蒸腾速率（T_r）、水分利用效率（*WUE*）、气孔导度（G_s）、胞间 CO_2 浓度（C_i）等光合指标探究植物对环境的响应，且这些指标对外界环境条件响应随测定时间和生长季节不同有所差异[7]。党晓宏等[8]对西鄂尔多斯地区5种荒漠植物日光合固碳能力研究表明，5种植物均属喜阳植物，沙冬青、霸王和红砂灌丛的光能利用效率相对较高。石松利等[3]对西鄂尔多斯同一生境四合木和霸王水分关系参数以及光合指标日变化进行测定，发现霸王的生存和适

① 收稿日期：2019－05－29； 修订日期：2019－07－18
基金项目：国家自然科学基金（41967009）；内蒙古农业大学高层次人才引进科研启动项目（NDYB2016－08）
作者简介：党晓宏（1986－），男，副教授，博士，硕士生导师，从事荒漠化防治研究. E-mail：dangxiaohong1986@126.com
通讯作者：高永. E-mai：13948815709@163.com

应能力强于四合木。黄雅茹等[9]对乌兰布和沙漠同一生境霸王和白刺秋季光合日变化特征研究表明,霸王的水分利用效率高于白刺。以往的研究鲜有对荒漠灌丛光合指标日变化和季变化的报道。本文以西鄂尔多斯地区沙冬青、霸王、半日花和红砂4种天然荒漠灌丛为研究对象,通过测定该地区环境因子和植物光合指标,分析4种天然优势灌丛的日变化和季变化,探究其在荒漠地区的光合生态适应性,以期为珍稀濒危植物保育研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于西鄂尔多斯国家级自然保护区(106°44′~107°43′E,39°13′~40°10′N),属暖温带大陆性季风气候,具有夏热冬寒、昼夜温差大、日照和太阳辐射时间长等特点。年平均气温7.8~8.1 ℃,年平均降水量162~172 mm,主要集中在6—8月,年潜在蒸发量2 470~3 481 mm,是年降水量的20倍以上,湿润系数小于0.13,日照时数3 120.7 h,光合有效时数3 138.5 $MJ\cdot m^{-2}$[10]。研究区以偏西北风为主,年平均风速约3.2 $m\cdot s^{-1}$,最大风速24.2 $m\cdot s^{-1}$。该区地貌类型多样,多以低山丘陵为主,海拔在1 500~2 100 m。植物所需水分主要来自天然降水,地下水埋深>15 m。土壤类型主要为棕钙土、灰漠土,具有土层浅薄、土质粗糙、养分贫瘠、腐殖质含量低等特点。植被类型多为强旱生灌木,主要优势灌木树种有沙冬青、霸王、半日花、红砂。伴生植物有灌木、半灌木油蒿(*Artemisia ordosica*)、绵刺(*Potaninia mongolica*)、唐古特白刺(*Nitraria tangutorum*)、松叶猪毛菜(*Salsola laricifolia*)和珍珠猪毛菜(*Salsola passerina*)等;其中伴有一定数量的多年生草本植物。

1.2 试验材料与方法

本研究分别于2015年8月中旬(夏季)、10月下旬(秋季)和2016年5月(春季)选择晴天,利用Li-6400便携式光合测定仪于07:00—20:00在自然光照下,测定4种优势荒漠灌丛的P_n、T_r、C_i、G_s等光合生理参数,每隔1 h测定1次。同时测定大气温度(T_a)、大气相对湿度(RH),选择生长健康、长势一致、光照均一、完全展开的叶片(红砂选用长势良好的枝条)进行测定,每株选取3个叶片(或枝条),每个叶片(或枝条)选取5个点进行测定。并计算$WUE=P_n/T_r$。而2015—2016年各月降雨量数据来源于西鄂尔多斯自然保护区管理局伊克布拉格荒漠草原试验区气象站。

1.3 数据处理

利用Excel 2007对试验数据进行整理,采用SPSS 20.0软件对各光合作用参数进行统计分析和相关性分析,采用Origin 2017绘制不同季节光合指标日变化动态图。

2 结果与分析

2.1 不同季节气温、相对湿度日变化和降雨量的年变化

温度和水分是影响植物生长发育的重要指标。研究区不同季节T_a日动态变化均呈"单峰形"。春季和夏季最高气温出现在13:00,其值分别为35.11 ℃、33.32 ℃;最低气温分别出现在07:00、20:00,其值分别为18.06 ℃、20.24 ℃。秋季最高温出现在15:00,其值为25.49 ℃,最低气温出现在09:00,其值为13.20 ℃。T_a日均温依次为:夏季(28.35 ℃)>春季(27.80 ℃)>秋季(20.22 ℃)(图1a)。5月和10月RH日变化趋势相似,均呈"单峰形"变化,峰值分别出现在12:00和18:00,其值为32.58%和49.94%,而8月RH变化趋势与之相反,整体呈"凹形"变化,谷值出现在14:00,其值为10.20%。2015和2016年总年降雨量分别为185.5 mm和119.7 mm,2015年总降雨量是2016年的1.55倍(图1b)。2015年8月、10月和2016年5月降雨量分别为1.80 mm、16.70 mm和8.90 mm(图1c)。综上可知,在春季和秋季,T_a与RH变化趋势具有一致性,而在夏季两者变化趋势相反。

2.2 不同季节荒漠灌丛光合指标的日动态变化

2.2.1 不同季节荒漠灌丛叶片净光合速率日动态变化

P_n代表植物有机物积累速率。由图2可知,3个季节不同荒漠优势灌丛P_n日变化均呈"双峰型",且第一峰度大于第二峰值,"光合午休"现象明显。但不同季节双峰出现时间各异。春季优势灌丛P_n日变化曲线波动较缓。P_n峰值分别出现在09:00—10:00和16:00,在第二个峰值后降低并趋于平稳。最低点出现在14:00(除霸王外)。夏季P_n峰值分别出现在11:00和15:00,最低点出现在12:00—13:00。秋季沙冬青的P_n变化较为明显,波动较大,其余3种植物曲线变化较平稳。P_n峰值分

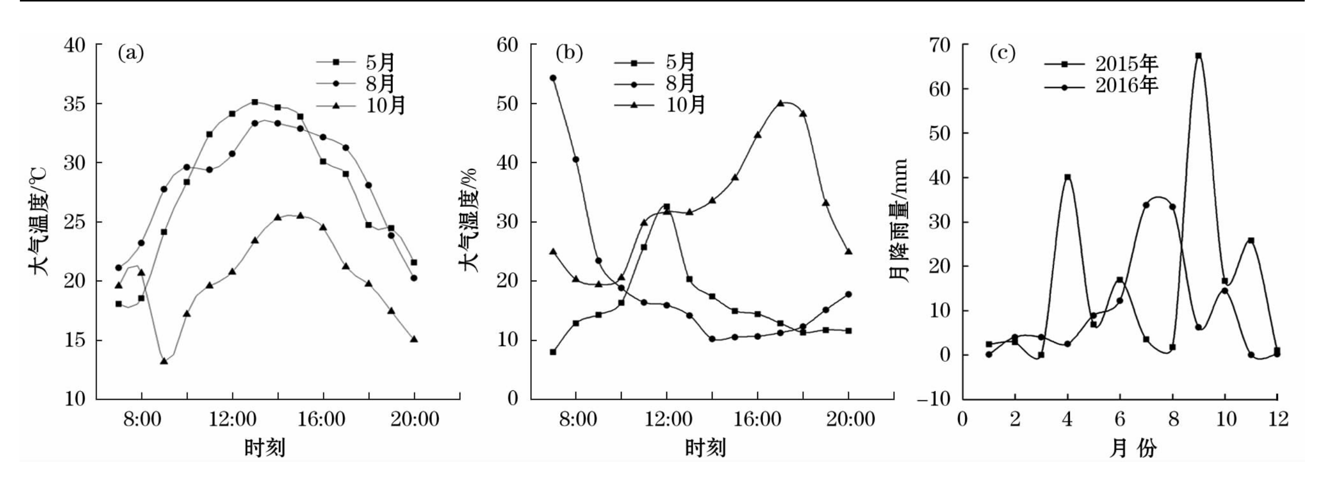


图 1　西鄂尔多斯主要气象因子变化情况

Fig. 1　Changes of main meteorological factors in Western Ordos

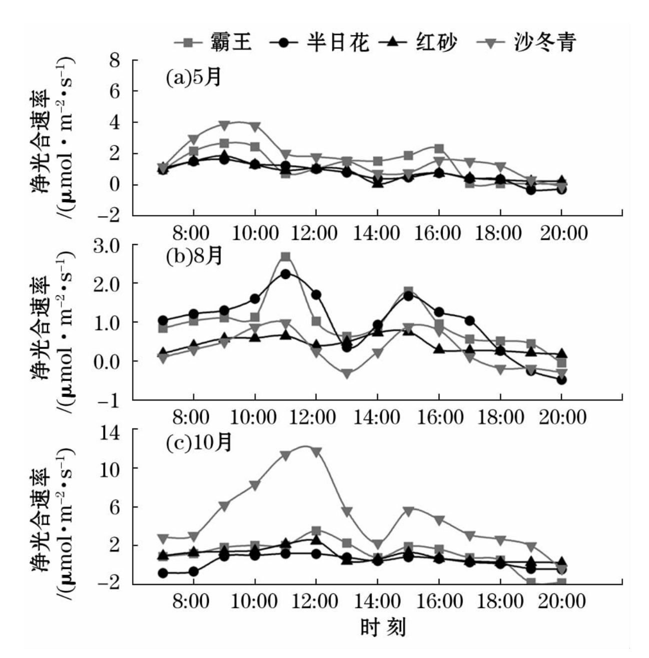


图 2　不同月份荒漠植物叶片净光合速率日变化

Fig. 2　Diurnal variation of net photosynthetic rate of desert plant leaves in different months

别出现在 12:00 和 15:00,最低点出现在 13:00—14:00,之后逐渐降低并趋于平稳。春季、秋季 4 种荒漠优势灌丛 P_n 日均变化趋势大体表现为:沙冬青 > 霸王 > 红砂 > 半日花。夏季 4 种荒漠优势灌丛 P_n 日均变化趋势大体表现为:半日花 > 霸王 > 红砂 > 沙冬青。3 个季节 4 种荒漠优势灌丛 P_n 平均日变化总体表现为:沙冬青(2.29 μmol · m^{-2} · s^{-1}) > 霸王(1.12 μmol · m^{-2} · s^{-1}) > 红砂(0.75 μmol · m^{-2} · s^{-1}) > 半日花(0.69 μmol · m^{-2} · s^{-1})。沙冬青、红砂 P_n 日均变化趋势大体表现为:秋季 > 春季 > 夏季,霸王 P_n 日均变化趋势大体表现为:春季 > 秋季 > 夏季,半日花 P_n 日均变化趋势大体表现为:夏季 > 春季 > 秋季。

2.2.2　不同季节荒漠灌丛叶片蒸腾速率日动态变化　T_r 是衡量植物水分平衡的重要指标,其与植物对环境的适应能力成正比[11]。由图 3 可知,春季,除霸王外,其余 3 种优势群落 T_r 日变化曲线波幅较大,整体呈现“双峰形”变化,峰值分别出现在 10:00 和 15:00,其值为:红砂 > 半日花 > 沙冬青,最低点出现在 13:00,红砂 > 沙冬青 > 半日花。霸王呈“单峰型”变化,峰值出现在 13:00;夏季红砂和半日花的曲线波幅明显,呈“双峰形”变化,霸王和沙冬青曲线变化趋于平缓。半日花峰值出现在12:00 和

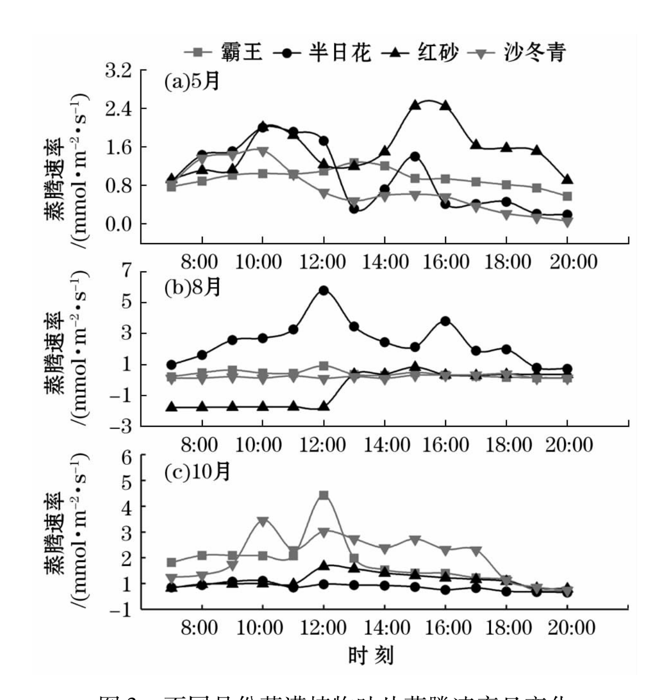


图 3　不同月份荒漠植物叶片蒸腾速率日变化

Fig. 3　Diurnal variation of transpiration rate of desert plants leaves in different months

16:00,霸王峰值分别在 12:00 和 15:00,红砂 T_r 日变化曲线在 12:00 上升,然后趋于平稳,沙冬青 T_r 日变化曲线几乎呈一条直线;秋季霸王和红砂 T_r 日变化曲线呈"单峰形"变化,峰值出现在 12:00。红砂 T_r 日变化曲线较为平稳,而沙冬青 T_r 日变化曲线呈"波浪",在 17:00 后逐渐下降,并趋于平缓。3 个季节 T_r 平均日变化总体表现各不相同。3 个季节 4 种荒漠优势灌丛 T_r 平均日变化总体表现为:半日花(1.26 mmol·m^{-2}·s^{-1})>霸王(0.86 mmol·m^{-2}·s^{-1})>沙冬青(0.81 mmol·m^{-2}·s^{-1})>红砂(0.54 mmol·m^{-2}·s^{-1})。沙冬青、霸王 T_r 平均日变化总体表现为:秋季>春季>夏季。半日花和红砂 T_r 平均日变化分别为:夏季>春季>秋季和春季>秋季>夏季。

2.2.3　不同季节荒漠灌丛叶片水分利用效率日动态变化　植物 *WUE* 是植物抗旱能力的重要指标,反映植物对逆境适应能力的强弱[12]。由图 4 可知,春季 4 种优势灌丛 *WUE* 日变化曲线呈"双峰形"。沙冬青峰值分别出现在 13:00 和 18:00,霸王峰值分别出现在 09:00 和 16:00,红砂峰值分别出现在 09:00 和12:00,半日花峰值分别出现在 13:00 和 16:00;夏季霸王和沙冬青 *WUE* 日变化曲线波幅较大,而半日花和红砂 *WUE* 日变化曲线波动趋于平缓。沙冬青、霸王、半日花*WUE*日变化曲线呈"双峰形",峰值分别出现在 10:00—11:00 和 13:00。红砂 *WUE* 曲线呈"单峰形"变化,峰值出现在 14:00。秋季沙冬青 *WUE* 日变化曲线呈"波浪",最大峰值出现在 19:00。其他 3 种优势灌丛 *WUE* 日变化曲线均呈"双峰形"。半日花和红砂峰值分别出现在 11:00 和 15:00—16:00;霸王峰值分别出现在 13:00 和 15:00。3 个季节 *WUE* 平均日变化总体表现与 T_r 相同。3 个季节 4 种荒漠优势灌丛 *WUE* 平均日变化总体表现为:沙冬青(2.37 μmol·mmol^{-1})>霸王(1.31 μmol·mmol^{-1})>红砂(0.95 μmol·mmol^{-1})>半日花(0.57 μmol·mmol^{-1})。沙冬青、半日花和红砂 *WUE* 平均日变化总体表现为:秋季>春季>夏季。霸王 *WUE* 平均日变化总体表现为:夏季>春季>秋季。

2.2.4　不同季节荒漠灌丛叶片气孔导度日动态变化　植物 G_s 反映气孔的关闭程度,能直接影响植物光合、呼吸和蒸腾作用[13]。由图 5 可知,春季 4 种优势灌丛 G_s 日变化曲线均呈"双峰形",峰值分别出现在 09:00 和 16:00;夏季沙冬青和霸王 G_s 日变化曲线波幅较大,G_s 日变化曲线均呈"双峰形",峰值分别出现在 11:00—12:00 和 15:00,而半日花和红砂日变化曲线波动幅度较小,G_s 日变化曲线均呈"单峰形"。秋季 4 种优势灌丛 G_s 日变化曲线波幅较大,且均呈"双峰形"曲线,峰值分别出现在

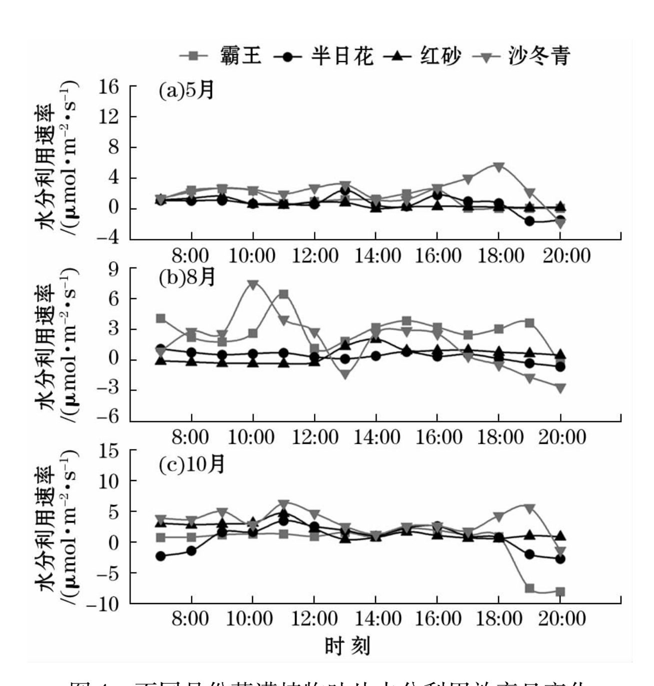


图 4　不同月份荒漠植物叶片水分利用效率日变化

Fig. 4　Diurnal variation of leaf water use efficiency of desert plants in different months

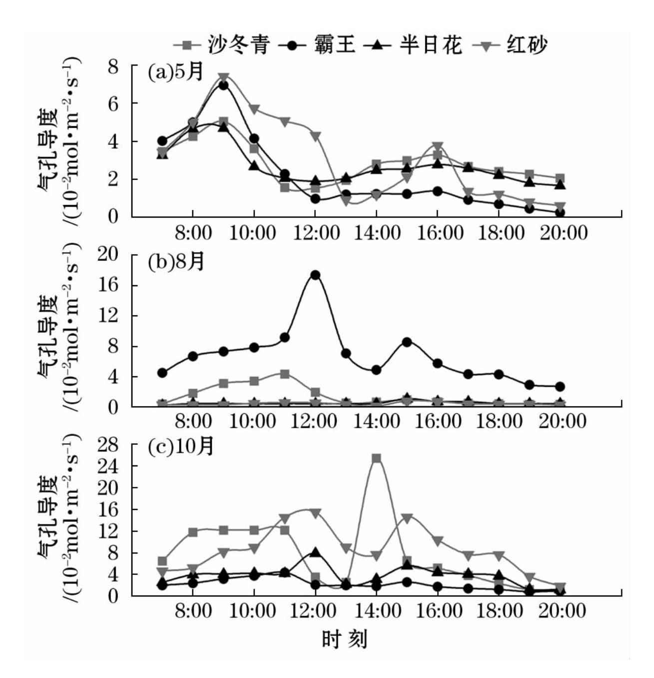


图 5　不同月份荒漠植物叶片气孔导度日变化

Fig. 5　Diurnal variation of stomatal conductance of desert plant leaves in different months

11:00—12:00 和 15:00,之后逐渐降低并趋于平缓。通过对比不同月份的 G_s 日变化曲线发现,不同季节 G_s 日变化波动明显,在春季和夏季曲线波动较小,在秋季波动较大。3 个季节 4 种荒漠优势灌丛 G_s 平均日变化总体表现为:沙冬青(0.039 mol · m^{-2} · s^{-1}) > 半日花(0.038 mol · m^{-2} · s^{-1}) > 霸王(0.037 mol · m^{-2} · s^{-1}) > 红砂(0.024 mol · m^{-2} · s^{-1})。3 个季节 G_s 平均日变化总体表现各不相同。沙冬青、霸王、红砂 G_s 平均日变化总体表现:秋季 > 春季 > 夏季。半日花 G_s 平均日变化总体表现为:夏季 > 春季 > 秋季。

2.2.5 不同季节荒漠灌丛叶片胞间 CO_2 浓度日动态变化 C_i 是衡量植物叶片光合速率的重要指标,同时也是判断光合作用是气孔因素还是非气孔因素的关键指标[14]。由图 6 可知,4 种优势灌丛 C_i 日变化曲线整体均呈"W 形"变化。在春季,一天中沙冬青、霸王和红砂的最大值出现在 07:00,半日花的最大值出现在 20:00。最小值均出现在 16:00。在夏季,一天中沙冬青、霸王、半日花的最大值出现在 20:00,红砂最大值出现在 08:00。沙冬青、霸王最小值出现在 11:00,半日花、红砂的最小值出现在 15:00。在秋季,一天中沙冬青、红砂最大值出现在 08:00,霸王、半日花的最大值出现在 20:00。霸王、红砂的最大值出现在15:00,沙冬青和半日花的最小值分别出现在 12:00 和 16:00。3 个季节 4 种荒漠优势灌丛 C_i 平均日变化表现各不相同,总体表现为:半日花(291.39 μmol · mol^{-1}) > 霸王(256.1 μmol · mol^{-1}) > 红砂(246.65 μmol · mol^{-1}) > 沙冬青(210.17 μmol · mol^{-1})。沙冬青、霸王、红砂 C_i 平均日变化总体表现:秋季 > 春季 > 夏季。半日花 C_i 平均日变化总体表现为:夏季 > 春季 > 秋季。

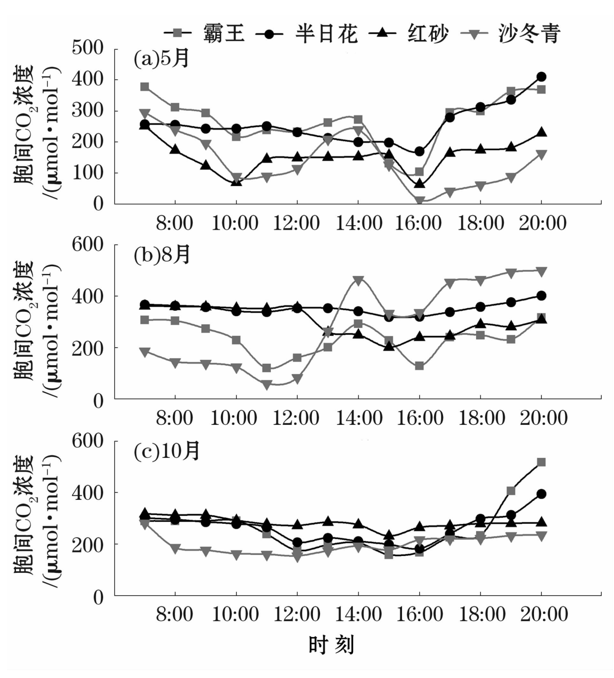


图 6 不同月份荒漠植物叶片胞间 CO_2 浓度日变化

Fig. 6 Diurnal variation of intercellular CO_2 concentration in desert plant leaves in different months

2.3 P_n 与环境因子的相关关系

从表 1 可知,春季,沙冬青 P_n 与 T_r 呈极显著正相关,与 G_s 呈显著正相关;霸王 P_n 与 WUE、G_s 呈极显著正相关,与 C_i 呈显著负相关;半日 P_n 与 T_r、G_s 呈极显著正相关,与 WUE 呈显著正相关,与 C_i 呈显著负相关;红砂 P_n 与 WUE、G_s 呈极显著正相关。由此可知,春季,对 4 种优势荒漠灌丛 P_n 的影响依次为:$G_s > WUE > T_r > C_i$。夏季,沙冬青和霸王 P_n 与 WUE、G_s 呈极显著正相关,与 C_i 呈显著负相关;半日花 P_n 与 WUE、G_s 呈极显著正相关,T_r 呈显著正相关,与 C_i 呈极显著负相关;红砂 P_n 与 T_a 呈显著相关。由此可知,夏季,对沙冬青、霸王和半日花 P_n 的影响依次为:$WUE > G_s > C_i > T_r$。而影响红砂 P_n 仅与 T_a 有关。秋季,沙冬青 P_n 与 T_r、G_s 呈极显著正相关,与 WUE 呈显著正相关,与 C_i 呈极显著负相关;霸王 P_n 与 T_r、G_s 呈极显著正相关,与 C_i 呈极显著负相关;半日花 P_n 与 WUE 呈极显著正相关,与 G_s 呈显著正相关,与 C_i 呈显著负相关;红砂 P_n 与 WUE、G_s 呈极显著正相关。由此可知,秋季,对 4 种优势荒漠灌丛 P_n 的影响依次为:$WUE > G_s > C_i > T_r$。

3 讨 论

3.1 气温、湿度对 4 种荒漠优势灌丛光合作用的影响

环境因子是影响植物生长发育的重要因素,不同季节植物光合作用适宜的温度不同[15]。本研究中,4 种荒漠优势灌丛春季和夏季 P_n 日变化峰值分别出现在 10:00、16:00 和 11:00、15:00,说明春季和夏季沙冬青、霸王、半日花的光合最适温度在 24 ℃ 和 29 ℃附近,红砂的光合最适温度为 28 ℃和 33 ℃附近;而秋季 4 种荒漠优势灌丛 P_n 日变化峰值分别出现在 12:00 和 15:00,说明 4 种荒漠优势灌丛的光合最适温度为 20 ℃。由此说明,高环境温度使荒漠优势灌丛P_n最适温度升高,低环境温度使其降

表 1 4 种荒漠灌丛 P_n 与环境因子的相关性

Tab. 1 Correlation between Pn and environmental factors in 4 dominant desert shrubs

季节	灌丛种类	T_r	WUE	G_s	C_i	T_a	RH
春季	沙冬青	0.906**	0.351	0.626*	0.036	-0.084	0.181
	霸王	0.517	0.985**	0.672**	-0.552*	0.132	0.092
	半日花	0.766**	0.649*	0.694**	-0.550*	-0.028	0.309
	红砂	-0.182	0.927**	0.886**	-0.306	-0.225	0.184
夏季	沙冬青	0.155	0.864**	0.677**	-0.549*	0.394	-0.083
	霸王	0.445	0.734**	0.726**	-0.536*	0.362	-0.021
	半日花	0.570*	0.796**	0.665**	-0.724**	0.454	0.072
	红砂	-0.105	0.105	0.342	-0.130	0.634*	-0.293
秋季	沙冬青	0.713**	0.557*	0.852**	-0.755**	0.042	-0.157
	霸王	0.793**	0.864**	0.240	-0.808**	0.350	-0.051
	半日花	0.512	0.943**	0.604*	-0.618*	0.180	0.107
	红砂	0.234	0.784**	0.763**	0.020	-0.052	-0.392

注：* 表示在 0.05 水平上显著相关，** 表示在 0.01 水平上显著相关。

低[16]。通过相关分析可知，除红砂外，其余荒漠植物 P_n 与 T_a 和 RH 相关性不显著，说明红砂作为超旱生植物，其抵御高温能力更强，对温度的生态适应幅较宽，反映了荒漠植物对环境温度的适应性。

3.2 4 种荒漠优势植物灌丛光合特性

本研究中，3 个季节 4 种植物 P_n 日变化曲线均呈“双峰形”，该研究结果与贾荣亮等[17]的研究结果一致。可见，同一生境条件下荒漠植物光合作用具有一定的趋同效应，这说明荒漠植物能根据外界环境变化进行自我调节，对外界环境变化做出弹性适应[18]。3 个季节 P_n 均存在“光合午休”现象。其原因是早晨随着 T_a 升高，植物叶片气孔逐渐变大，光合作用增强，G_s 减小，P_n 日变化在 09:00—11:00 达到峰值。此后，随着 T_a 继续升高，而 T_r 逐渐增强，蒸腾失水加强导致荒漠植物气孔阻力增大，使气孔关闭，G_s 和 P_n 减小，光合速率下降产生光抑制，引起光合下调，出现“光合午休”现象[19]。这是荒漠灌丛在适应恶劣环境过程中长期进化而形成的一种自我保护机制。同时，说明 4 种荒漠优势灌丛均在西鄂尔多斯高温、干旱环境中的适应能力较强[20]。本研究中，4 种荒漠灌丛的净光合速率大小各异，沙冬青、红砂 P_n 日均变化表现为：秋季 > 春季 > 夏季，霸王 P_n 日均变化表现为：春季 > 秋季 > 夏季，半日花 P_n 日均变化表现为：夏季 > 春季 > 秋季。该研究结果与李征珍[21]等对沙冬青的研究结果不同，这可能与测定月份的降雨量有关。2015 年 8 月的降雨量仅有 1.80 mm，而秋季降雨量为 16.70 mm，是夏季降雨量的 8.28 倍。可见，夏季荒漠植物受到不同程度的干旱胁迫，导致气孔关闭限制了荒漠植物的光合作用，影响了荒漠植物的生长发育。本研究还发现，不同季节 4 种荒漠优势灌丛的 P_n 和 T_r 日变化趋势相近且近乎同步，说明灌丛气孔对外界环境变化的反应较为敏感[22]。而且，当气温最高时，不同季节 4 种荒漠优势灌丛（除春季霸王外）能保持较低的蒸腾速率，说明荒漠灌丛水分利用效率高，调节能力较强。而霸王在春季的蒸腾速率较高，其原因可能是此时的温度超过了霸王光合作用的最适温度，为了避免高温造成叶片损伤，霸王通过蒸腾作用增加水分散失使叶温降低，保护植物机械组织免受高温、强光灼伤。以上现象均反映了荒漠灌丛适应干旱环境变化的应对策略[21]。

水分利用效率反映植物对环境的适应能力[23]。本研究中，沙冬青、半日花和红砂 WUE 平均日变化总体表现为：秋季 > 春季 > 夏季；霸王 WUE 平均日变化总体表现为：夏季 > 春季 > 秋季。说明不同季节植物对环境的适应能力存在差异。沙冬青、半日花和红砂对干旱环境的适应能力在秋季最强，其次为春季，在夏季最弱。而霸王则为夏季最强，其次为春季、秋季最弱。为了保证荒漠植物的群落稳定性和生物多样性，应在夏季和秋季分别对沙冬青、半日花、红砂和霸王进行水分管理。从总体看，3 个季节 4 种荒漠优势灌丛的 C_i 日变化趋势与 P_n 相反，呈中午低，早晚高的趋势。这主要是因为中午气温较高，植物为了防止水分散失关闭气孔，而气

孔关闭限制了外界 CO_2 进入叶片。与此同时,植物光合速率增加胞间 CO_2 的消耗,进而使胞间 CO_2 下降[24]。

4 结 论

(1) 不同季节荒漠灌丛光合作用适宜的温度不同,高环境温度使荒漠灌丛 P_n 最适温度升高,低环境温度使其降低。

(2) 总体上不同季节 4 种荒漠灌丛的 P_n、T_r、WUE 和 G_s 日变化曲线趋势为"双峰形",C_i 日变化曲线趋势为"W 形",但不同季节各指标平均日变化趋势表现各异。

(3) 通过相关分析发现,荒漠植物 P_n 与 T_a 和 RH 相关性不显著(除红砂外)。不同季节 4 种灌丛的净光合能力不同,大体表现为:沙冬青 > 霸王 > 红砂 > 半日花,说明沙冬青具有较强的生态适应性,而半日花的生态适应能力相对较差。所以,要对半日花进行就地保护。

(4) P_n 和 T_r 日变化趋势几乎保持同步状态,表明 4 种荒漠灌丛气孔对外界环境变化反应敏感。

(5) 水分是限制 4 种优势荒漠灌丛生长的关键因素。为了保证荒漠植物的群落稳定性和生物多样性,在夏季和秋季分别对沙冬青、半日花、红砂和霸王进行适量的水分管理。

参考文献(References):

[1] 孙安安,智颖飙,姜平平,等. 西鄂尔多斯四种荒漠植物合作用特征与差异性[J]. 生态学报,2019,39(13):1-8. [Sun An'an, Zhi Yingbiao, Jiang Pingping, et al. Characteristics of and differences in photosynthesis in four desert plants in West Ordos[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(13):1-8.]

[2] 董雪,杨永华,高永,等. 西鄂尔多斯沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)平茬效应初探[J]. 中国沙漠,2013,33(6):1723-1730. [Dong Xue, Yang Yonghua, Gao Yong, et al. Effect of cutting on *Ammopiptanthus mongolicus* in Western Ordos Plateau, Mongolia, China[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(6): 1723-1730.]

[3] 石松利,王迎春,周红兵,等. 濒危种四合木与其近缘种霸王水分关系参数和光合特性的比较[J]. 生态学报,2012,32(4): 159-169. [Shi Songli, Wang Yingchun, Zhou Hongbing, et al. Comparative analysis of water related parameters and photosynthetic characteristics in the endangered plant *Tetraena mongolica* Maxim. and the closely related *Zygophyllum xanthoxylon* (Bunge) Maxim[J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(4):159-169.]

[4] 王林龙,刘明虎,李清河,等. 不同生境半日花(*Helianthemum songaricum*)植物构型特征[J]. 中国沙漠,2016,36(3):651-658. [Wang Linlong, Liu Minghu, Li Qinghe, et al. Architecture characteristics of *Helianthemum songaricum* under different habitats [J]. Journal of Desert Research,2016,36(3):651-658.]

[5] Eek R L. Consequences of phenotypic plasticity vs. interspecific differences in leaf and root traits for acquisition of aboveground and belowground resources[J]. American Journal of Botany,2000,87(3):402-411.

[6] 吉小敏,宁虎森,梁继业,等. 不同水分条件下梭梭和多花柽柳苗期光合特性及抗旱性比较[J]. 中国沙漠,2012,32(2): 399-406. [Ji Xiaomin, Ning Husen, Liang Jiye, et al. Comparison of drought resistance and photosynthetic characteristics of *Haloxylon ammodendron* and *Tamarix hohenackeriat* seedling stage under different moisture conditions[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(2):399-406.]

[7] 白坤栋,蒋得斌,曹坤芳,等. 哀牢山和猫儿山中山常绿和落叶阔叶树光合特性对季节温度变化的响应[J]. 生态学报,2010, 30(4):905-913. [Bai Kundong, Jiang Debin, Cao Kunfang, et al. Photosynthetic response to seasonal temperature changes in evergreen and deciduous broad-leaved trees in montane forests of Ailao Mountain and Mao'er Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010,30(4):905-913.]

[8] 党晓宏,蒙仲举,高永,等. 西鄂尔多斯地区 5 种荒漠灌丛光合固碳能力研究[J]. 干旱区资源与环境,2017,31(11):128-135. [Dang Xiaohong, Meng Zhongju, Gao Yong, et al. Photosynthetic carbon fixation capacity of five natural desert shrubs in west Ordos region[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2017,31(11):128-135.]

[9] 黄雅茹,刘芳,马迎宾,等. 乌兰布和沙漠霸王与白刺秋季光合日变化特征比较[J]. 甘肃农业大学学报,2016,51(4):78-83. [Huang Yaru, Liu Fang, Ma Yingbin, et al. A comparison of diurnal variations of photosynthetic characteristics of *Nitraria tangutorum* and *Zygophyllum xanthoxylum* in autumn in Ulanbu desert [J]. Journal of Gansu Agricultural University,2016,51(4):78-83.]

[10] 智颖飙,杨持,李红丽,等. 孑遗植物四合木(*Tetraena mongolica*)异地保护条件下的气候生物学特征与光合效率[J]. 中国沙漠,2014,34(1):88-97. [Zhi Yingbiao, Yang Zhi, Li Hongli, et al. The bioclimatology and photosynthetic characteristics for the *ex-situ* conservation of the endemic of relict shrub *Tetraena mongolica*[J]. Journal of Desert Research,2014,34(1):88-97.]

[11] 丁俊祥,邹杰,唐立松,等. 克里雅河流域荒漠-绿洲交错带 3 种不同生活型植物的光合特性[J]. 生态学报,2015,35(3): 733-741. [Ding Junxiang, Zou Jie, Tang Lisong, et al. Photosynthetic characteristics of three different life-form plants in the desert-oasis ecotone of Keriya River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(3):733-741.]

[12] 于文颖,纪瑞鹏,冯锐,等. 不同生育期玉米叶片光合特性及水

分利用效率对水分胁迫的响应[J]. 生态学报,2015,35(9):2902－2909. [Yu Wenying,Ji Ruipeng,Feng Rui,et al. Response of water stress on photosynthetic characteristics and water use efficiency of maize leaves in different growth stage[J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(9):2902－2909.]

[13] 闫年,吴文友,刘桂华,等. 四个杨树品系夏季光合作用日变化[J]. 林业工程学报,2011,25(2):48－52. [Yan Nian,Wu Wenyou,Liu Guihua,et al. A study on diurnal variation of photosynthesis in four *Populus strains*[J]. Journal of Forestry Engineering,2011,25(2):48－52.]

[14] 孟猛,倪健,张治国. 地理生态学的干燥度指数及其应用评述[J]. 植物生态学报,2004,28(6):853－861. [Meng Meng,Ni Jian,Zhang Zhiguo. Aridity index and its applications in geo-ecology study[J]. Acta Phytoecologica Sinica,2004,28(6):853－861.]

[15] 谭会娟,周海燕,李新荣,等. 珍稀濒危植物半日花光合作用日动态变化的初步研究[J]. 中国沙漠,2005,25(2):120－125. [Tan Huijuan,Zhou Haiyan,Li Xinrong,et al. Primary studies on daily photosynthetic changes of rare and endangered plant *Helianthemum soongoricm*[J]. Journal of Desert Research,2005,25(2):120－125.]

[16] 张小全,徐德应. 温度对杉木中龄林针叶光合生理生态的影响[J]. 林业科学,2002,38(3):27－33. [Zhang Xiaoquan,Xu Deying. Effects of temperature on photosynthetic physio-ecology of 18－year-old Chinese fir [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.][J]. Scientia Silvae Sinicae,2002,38 (3):27－33.]

[17] 贾荣亮,周海燕,谭会娟,等. 超旱生植物红砂与珍珠光合生理生态日变化特征初探[J]. 中国沙漠,2006,26(4):631－636. [Jia Rongliang,Zhou Haiyan,Tan Huijuan,et al. Preliminary studies on diurnal variances of physio-ecological characteristics of photosynthesis of two extreme xerophytes-*Reaumuria soongorica* and *Salsola passerina*[J]. Journal of Desert Research,2006,26(4):631－636.]

[18] 师生波,刘克彪,张莹花,等. 民勤沙生植物园 4 种云杉属植物光化学特性的趋同适应[J]. 生态学报,2017,37(15):5039－5048. [Shi Shengbo,Liu Kebiao,Zhang Yinghua,et al. Convergent adaptation of PS Ⅱ photochemical characteristics of four spruce species growing in Minqin Desert Botanical Garden[J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(15):5039－5048.]

[19] 包永志,刘廷玺,段利民,等. 科尔沁沙地混生小叶锦鸡儿和人工杨树光合特性及其对气候的响应[J]. 干旱区研究,2019,36(2):420－429. [Bao Yongzhi,Liu Tingxi,Duan Limin,et al. Photosynthetic traits of *Caragana microphylla* and *Populus* spp. and their responses to climate in the Horqin Sandy Land[J]. Arid Zone Research,2019,36 (2):420－429.]

[20] 骆郴,谭勇,刘彤,等. 绿洲与沙漠地带疏叶骆驼刺(*Alhagi sparsifolia.*)光合生理特征的适应差异[J]. 干旱区地理,2006,29(4):503－509. [Luo Chen,Tan Yong,Liu Tong,et al. Differences of photosynthetic and physiological adaption between oasis and dersert on *Alhagi sparsifolia* [J]. Arid Land Geography,2006,29(4):503－509.]

[21] 李征珍,杨琼,石莎,等. 蒙古沙冬青光合作用特征及其影响因素[J]. 生态学杂志,2017,36(9):2481－2488. [Li Zhengzhen,Yang Qiong,Shi Sha,et al. The photosynthetic characteristics of *Ammopiptanthus mongolicus* and its affecting factors[J]. Chinese Journal of Ecology,2017,36(9):2481－2488.]

[22] 王仲礼,赵雪,刘林德,等. 胡杨(*Populus euphratica*)和沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)对荒漠环境的适应性比较[J]. 中国沙漠,2015,35(1):160－166. [Wang Zhongli,Zhao Xue,Liu Linde,et al. An analysis of the adaptability of *Populus euphratica* and *Elaeagnus angustifolia* to changes in environmental factors [J]. Journal of Desert Research,2015,35(1):160－166.]

[23] 孙胜楠,王强,孙晨晨,等. 黄瓜幼苗光合作用对高温胁迫的响应与适应[J]. 应用生态学报,2017,28(5):1603－1610. [Sun Shengnan,Wang Qiang,Sun Chenchen,et al. Response and adaptation of photosynthesis of cucumber seedlings to high temperature stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2017,28(5):1603－1610.]

[24] 程业森,赵晨光,高立平. 阿拉善白刺生长季光合速率及蒸腾速率特征研究[J]. 干旱区资源与环境,2017,31(11):161－168. [Cheng Yesen,Zhao Chenguang,Gao Liping. Study on the photosynthetic rate and transpiration rate of *Nitraria* in Alxa[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2017,31(11):161－168.]

Photosynthetic characteristics and ecological adaptability of desert shrubs in western Ordos

DANG Xiao-hong[1,2], MENG Zhong-ju[1], GAO Yong[1,2], LIU Yang[3], WEI Ya-juan[1], HA Qin[4]

(1. *Desert Control Science and Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot* 010018, *Inner Mongolia, China*;
2. *Inner Mongolia Hangjin Desert Ecolosytem Research Station, Erdos* 017400, *Inner Mongolia, China*;
3. *Institute of Water Conservancy Science Inner Mongolia Municipality, Hohhot* 010020, *Inner Mongolia, China*;
4. *Inner Mongolia Forestry and Grassland Administration of Bahrain Left Banner, Chifeng* 025450, *Inner Mongolia, China*)

Abstract: To explore the ecological adaptability of desert shrubs in Western Ordos, four shrub species growing in this region were selected as test materials: *Helianthemum songaricum*, *Reaumuria songarica*, *Ammopiptanthus mongolicus*, and *Sarcozygium xanthoxylum*. Their photosynthetic physiological indices were measured using the Li－6400 photosynthesis system during diurnal and seasonal variations. Optimum temperature for photosynthesis varied across seasons; optimum temperature for net photosynthetic rate in desert shrubs increased in summer and decreased in winter. Diurnal variation curves for net photosynthetic rate, transpiration rate, water use efficiency, stomatal conductance, and intercellular CO_2 concentration of the four dominant desert shrubs in the three seasons were "bimodal" and assumed the shape of "W"; however, average diurnal variation trends of each index varied across seasons. Net photosynthetic rate of the four shrubs varied across seasons and followed the order of *A. mongolicus* > *C. xanthoxylum* > *R. songarica* > *H. songaricum*; thus, *A. mongolicus* showed the greatest ecological adaptability. Diurnal trends of net photosynthetic and transpiration rates were almost synchronous, indicating that stomata of these four dominant shrubs were sensitive to environmental changes. Water is a key factor limiting the growth and development of the four desert shrubs studied. To ensure the stability and diversity of desert plant communities, water management was conducted in summer and autumn for the four tested shrubs.

Key words: ecological adaptability; photosynthesis; dominant shrubs; dynamic changes; western Ordos; Inner Mongolia